

PERKEMBANGAN RISET APLIKASI POLARIZATION IMAGING BY REFLECTION UNTUK OBJEK TRANSPARAN DALAM BIDANG COMPUTER VISION

Mohammad Iqbal *, Imam Ahmad Trinugroho **

Universitas Gunadarma

Fakultas Ilmu Komputer

Jl. Margonda Raya 100, Depok, Indonesia

E-mail: {mohiqbal,imam}@staff.gunadarma.ac.id

ABSTRAKSI

Pemanfaatan Polarisasi cahaya merupakan salah satu metode untuk mendapatkan informasi yang lebih luas dari suatu objek dalam bidang computer vision. Suatu objek yang memantulkan cahaya atau terkena proses penghamburan cahaya jika ditangkap oleh peralatan konvensional dan diolah dengan manipulasi intensitas cahaya dan warna saja terkadang tidak membawa informasi yang cukup untuk dapat mengenali benda tersebut. Oleh sebab itulah diperlukan suatu metode yang dapat mereduksi fenomena tersebut, sekaligus dalam perkembangannya dapat memberikan informasi tambahan yang lebih luas dari suatu objek yang diobservasi. Salah satunya adalah dengan mengkombinasikan peralatan optik lensa polarisasi dengan kamera untuk menangkap citra objek lalu menghitung beberapa parameter polarisasinya. Paper ini membahas beberapa metode penangkapan citra terpolarisasi pada objek transparan yang memantulkan cahaya dan membahas beberapa metode analisis polarisasi cahaya dari objek tersebut.

Keywords: Optics, Polarization imaging, computer vision, reflection.

1. PENDAHULUAN

Polarisasi cahaya adalah fenomena optik yang biasa terjadi di bumi (Konnen, 1985). Penghamburan cahaya (Scattering) dan pemantulan cahaya (reflection) merupakan hal terbanyak yang menyebabkan terjadinya fenomena ini di alam. Menurut beberapa penelitian, sumber kejadian polarisasi cahaya dapat dikategorikan dalam 3 bagian besar, yaitu :

1. Sumber cahaya parsial linier terpolarisasi (partially linearly polarized light) yang disebabkan oleh proses scattering cahaya matahari dengan atmosfer bumi (Coulson, 1988).
2. Polarisasi cahaya pada dunia bawah laut yang disebabkan oleh proses scattering cahaya matahari pada air (Jerlov, 1976).
3. Polarisasi cahaya oleh refleksi (pantulan) dari permukaan yang mengkilap seperti permukaan air atau beberapa jenis bahan yang dapat memantulkan cahaya lainnya seperti logam metalik, dan permukaan dielektrik seperti tanah, bebatuan maupun tumbuh-tumbuhan. (Konnen, 1985).

Penggunaan polarisasi untuk memahami suatu citra adalah suatu perluasan dari kemampuan mengindra cahaya dari sekedar mengindra intensitas dan warna cahaya. Masing-masing kejadian polarisasi di alam ini dapat diukur dengan berbagai bentuk persamaan matematika untuk mendapatkan informasi yang dapat dimanfaatkan

untuk berbagai keperluan penginderaan lingkungan oleh mesin atau komputer, objek tersebut meliputi derajat polarisasi, sudut polarisasi dan variasi intensitas cahaya yang dihasilkan dari polarisasi.

Bagian pertama dari paper ini membahas tentang sistem penangkapan citra yang dilakukan agar dapat memanfaatkan Polarisasi cahaya dari objek yang memantulkan cahaya. Bagian kedua membahas beberapa proses dasar pengambilan informasi polarisasi yang diakibatkan oleh pemantulan cahaya pada objek supaya dapat dimanfaatkan untuk pemrosesan selanjutnya. Di bagian ketiga membahas metode analisis polarisasi dan bagian terakhir adalah kesimpulan yang dididapat dari pembahasan pada bagian sebelumnya.

2. SISTEM PENANGKAPAN CITRA

Sistem ini amat penting dalam rangkaian pengambilan informasi polarisasi dari objek yang memantulkan cahaya. Kesalahan dalam pemilihan jenis filter polarisasi, kamera dan instalasi, tentu akan mempengaruhi akurasi deteksi terhadap objek tersebut.

Jenis Filter dan Kamera Polarisasi

Kamera CCD (charge-couple device) komersial yang tersedia di pasaran didesain untuk menangkap intensitas cahaya dan warna dari suatu objek saja, sehingga tidak dapat dipakai untuk menangkap citra Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2008 (SNATI 2008) ISBN:

979-756-061-6 Yogyakarta, 21 Juni 2008 G-2 terpolarisasi. Kamera yang yang dapat dimanfaatkan untuk menangkap citra terpolarisasi terdiri atas 2 jenis, yaitu Kamera akuisisi citra optikmekanik dan kamera akuisisi citra optic elektronik.

Kamera akuisisi citra optik-mekanik

Pada awalnya para peneliti menggunakan kamera monokrom atau kamera warna tipe CCD ini dengan menambahkan komponen filter polarisasi linier yang dapat dirotasikan secara mekanis di depan lensa kamera tersebut.

Desain kamera seperti ini kemudian digunakan untuk menangkap beberapa jenis citra objek yang sama dengan orientasi polarisasi yang berbeda, dengan cara mengubah orientasi filternya. Perhitungan polarisasi dengan cara ini paling tidak membutuhkan 3 jenis komponen citra terpolarisasi yang berbeda, biasanya dengan sudut 0° , 45° dan 90° . Namun, jika tidak dilakukan dengan teliti, cara rotasi mekanik ini dapat menyebabkan terjadinya pergeseran geometrik penampilan proyeksi citra pada kamera, yang menghasilkan kesalahan yang signifikan dalam pengukuran parameter polarisasi (WOLFF, 1995).

Kamera akuisisi citra optik elektronik

Kamera jenis ini adalah kamera yang secara elektronis dilengkapi sensor yang mengatur orientasi polarisasi secara otomatis.

Pada desain awal, terdapat 3 jenis kamera yang didesain khusus untuk menangkap citra terpolarisasi yaitu :

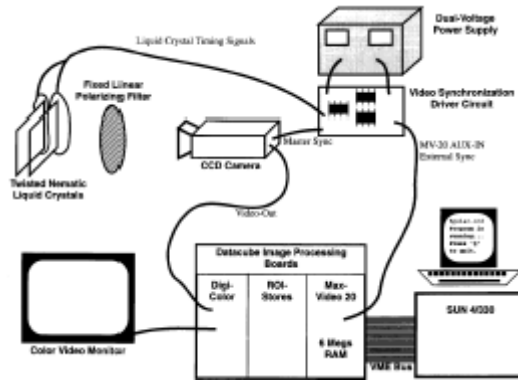
- (1) Akuisisi serial komponen polarisasi menggunakan liquid crystal
- (2) Akuisisi parallel komponen polarisasi menggunakan pasangan stereo kamera dan pemisah cahaya terpolarisasi, dan
- (3) Prototype chip photosensing.

Selanjutnya, kemudian tercetus ide untuk membuat kamera dengan kristal buatan yang memiliki sifat-sifat yang mampu mendeteksi fenomena polarisasi, diciptakanlah

- (4) Kamera PLZT.

(1) Akuisisi serial menggunakan liquid crystal

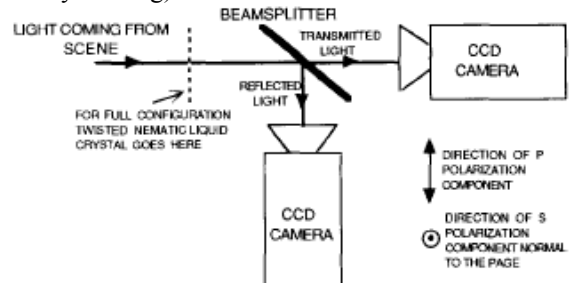
Kamera ini menggunakan 2 twisted nematic (TN) liquid crystal yang diletakkan di depan CCD kamera. TN adalah suatu alat elektro-optik yang akan mengendalikan komponen cahaya parsial linear polarisasi yang bergerak melaluinya. Komponen polarisasi dari citra akan segera diketahui secara seri tanpa perlu melakukan rotasi secara mekanik filter polarisasi.



Gambar 1. Akuisisi serial menggunakan liquid crystal (WOLFF & ANDREOU, 1995)

(2) Akuisisi parallel menggunakan pasangan stereo kamera dan pemisah cahaya terpolarisasi

Pada kamera jenis ini, setelah terpolarisasi parsial linier karena melewati liquid crystal, cahaya yang tiba akan dipecah kedua arah dengan komponen polarisasi yang berbeda satu sama lain ke dua CCD kamera oleh beam splitter. Satu jenis membawa informasi pantulan cahaya 45° dan satu lagi membawa informasi transmisi cahaya. Dengan 2 informasi ini, maka didapatkan 2 jenis komponen polarisasi yaitu P (komponen polarisasi parallel dengan arah cahaya datang) dan S (komponen polarisasi tegak lurus dengan arah cahaya datang).



Gambar 2. Akuisisi parallel menggunakan stereo kamera dan beam splitter (WOLFF & ANDREOU, 1995)

(3) Prototype chip photosensing

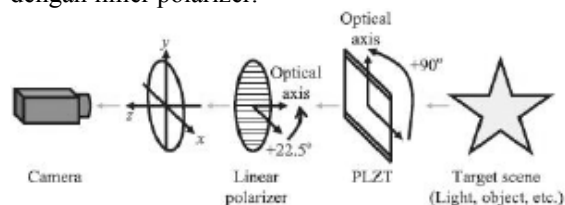
Kedua jenis kamera yang pertama di desain menggunakan optik eksternal yang tidak secara langsung diproses pada chip photosensing. Sedangkan prototipe kamera ini merupakan bentuk terpadu yang didesain melakukan fileterisasi optic langsung ke chip photosensing. Secara prinsip, cara kerja kamera ini tidak berbeda dengan kamera sebelumnya, hanya saja proses perhitungan parameter polarisasinya sudah dalam suatu chip khusus tersendiri.

(4) Kamera PLZT

PLZT adalah merupakan kristal buatan elektro optik yang transparan dengan material keramik dan memiliki sifat-sifat birefringence

(cahaya yang memiliki resolusi) yang membuat PLZT dapat berfungsi sebagai retarder dengan mengubah medan listrik.

Dalam suatu penelitian untuk mendeteksi objek transparan, skenario pemanfaatan kamera PLZT ini adalah dengan mengkombinasikannya dengan linier polarizer.



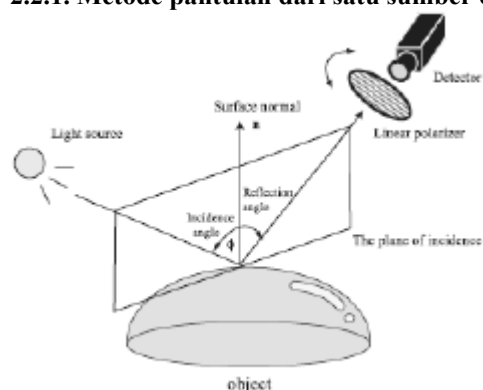
Gambar 3. Kamera PLZT dikombinasikan dengan polarizer (DAISUKE MIYAZAKI, et al. 2005).

2.2. Skenario Instalasi Penangkapan Citra

Skenario ini disusun dengan tujuan agar bias mendapatkan informasi komponen polarisasi yang memadai dari suatu objek yang memantulkan cahaya.

Pada bagian ini, penulis memilih beberapa perkembangan pengetahuan dari penelitian yang membahas mengenai estimasi bentuk dari suatu transparan objek, karena objek transparan memiliki informasi yang lebih luas daripada objek biasa. Objek ini, selain memiliki informasi pantulan cahaya dari permukaannya (sering disebut pantulan permukaan), juga memiliki pantulan dari bagian dalam objek yang merupakan cahaya hasil transmisi ke dalam tubuh objek tersebut (disebut body reflection). Dua sumber informasi ini bias dimanfaatkan dengan meletakkan peralatan penangkap citra pada posisi yang tepat.

2.2.1. Metode pantulan dari satu sumber cahaya

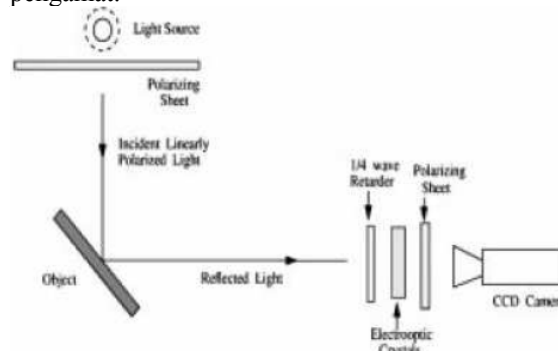


Gambar 4. Instalasi kamera polarisasi deteksi objek transparan (MEGUMI, 1999)

Metode ini dipakai untuk mengestimasi bentuk dari objek yang diobservasi. Objek dengan informasi polarisasi kemudian dianalisis dengan menggunakan formula pantulan fresnel. Maka, proses instalasi dilakukan dengan meletakkan sumber cahaya pada posisi yang berlawanan dengan kamera yang diberi polarizer linier di depan

lensanya. Sudut cahaya datang dan sudut cahaya pantul dari objek sama.

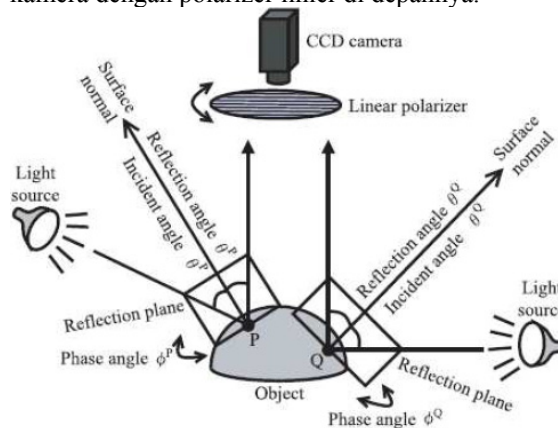
Metode ini juga diterapkan oleh Wolff dan Chen namun dengan menerapkan banyak filter baik dari sumber cahaya maupun dari depan kamera pengamat.



Gambar 5. Instalasi kamera polarisasi deteksi objek transparan (WOLFF & CHEN, 1998)

2.2.2. Metode pantulan dari multi sumber cahaya

Metode ini mengambil informasi polarisasi dengan sudut pantul yang berbeda dari metode pertama. Kekurangan pencahayaan pada metode pertama diatasi dengan memberikan dua sumber cahaya dari dua titik yang berbeda, namun memiliki sudut pantul dengan arah yang sama menuju kamera dengan polarizer linier di depannya.



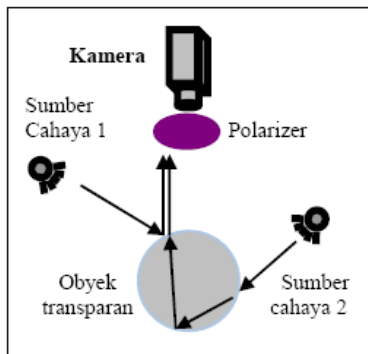
Gambar 6. Instalasi kamera polarisasi deteksi objek transparan (MIYAZAKI, 2002)

2.2.3. Metode pantulan dan transmisi dari multi sumber cahaya

Metode ini merupakan pengembangan dari metode-metode sebelumnya. Sebab, ternyata dua metode sebelumnya, walau pun sudah ditambah dengan lebih dari satu sumber cahaya tetap tidak cukup untuk bisa mengidentifikasi bentuk objek transparan secara presisi.

Keistimewaan metode ini adalah penempatan sumber cahaya yang memungkinkan cahaya dapat dipantulkan dari permukaan objek transparan secara langsung (sumber cahaya 1) untuk mengestimasi sisi depan dari objek transparan dan yang lainnya

adalah sumber cahaya yang memungkinkan cahaya mengalami transmisi ke bagian dalam objek terlebih dahulu, lalu dipantulkan menuju kamera pengobservasi (sumber cahaya 2), sehingga bias mengestimasi sisi belakang dari objek transparan tersebut.



Gambar 7. Instalasi kamera polarisasi deteksi objek transparan (DAISUKE MIYAZAKI, et al. 2005)

2. METODE ANALISIS POLARISASI

Terdapat banyak metode penghitungan status polarisasi dari cahaya pada suatu benda yang mengalami proses pemantulan, yaitu (i) perhitungan sederhana menggunakan formula Fresnel, (ii) menggunakan matrik koheren, (iii) menggunakan matrik Mueller dan (iv) menggunakan kalkulus Jones. Namun dalam paper ini akan dibahas (i) dan (iii) saja yang merupakan metode dasar dan metode terpopuler dalam menghitung status polarisasi tersebut.

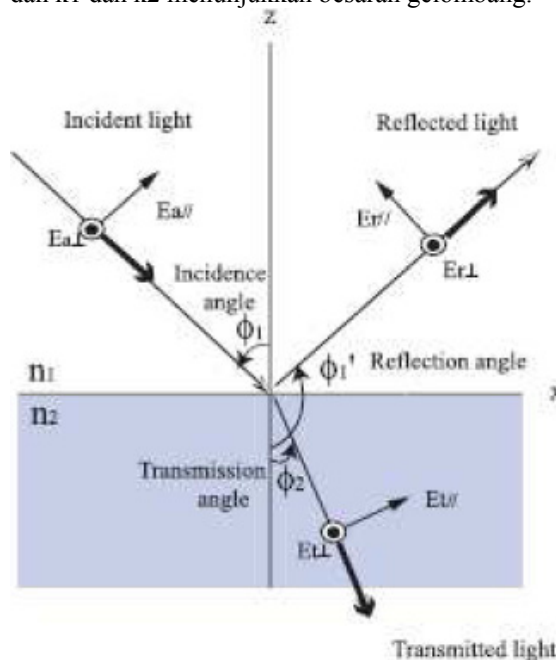
Menggunakan Hukum Fresnel

Hukum Fresnel ini kita gunakan sebagai dasar untuk menghitung status polarisasi. Hukum ini terkait pula dengan hukum Maxwell yang menyebut bahwa gelombang cahaya adalah gelombang elektromagnet. Hukum pemantulan cahaya yang menyebutkan bahwa untuk permukaan yang tidak menghamburkan cahaya sudut pantul selalu sama dengan sudut datang ini dapat digunakan untuk menghitung intensitas pantulan. Selanjutnya, dengan menambahkan karakteristik polarizer kita bias mendapatkan status polarisasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8.

Komponen polarisasi dari cahaya datang, cahaya dipantulkan dan cahaya yang ditransmisikan akan paralel dan tegak lurus pada x-z dan diekspresikan dengan \parallel dan \perp . Kemudian kita definisikan sudut cahaya datang ϕ_1 , sudut refleksi ϕ_1' dan sudut transmisi ϕ_2 . Cahaya datang dan cahaya yang dipantulkan akan menuju medium yang sama, maka kita dapatkan $\phi_1 = \phi_1'$. Maka, cahaya datang, cahaya dipantulkan dan komponen transmisi dari medan elektrik vektor akan paralel pada x-z, sehingga :

$$\begin{aligned} E_{a\parallel} &= A_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 + z \cos \phi_1)\}] \\ E_{r\parallel} &= R_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 - z \cos \phi_1)\}] \\ E_{t\parallel} &= T_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_2(x \sin \phi_2 + z \cos \phi_2)\}] \end{aligned} \quad (1)$$

dimana A_{\parallel} , R_{\parallel} dan T_{\parallel} adalah amplitudo dari ketiga komponen tersebut, ω adalah frekuensi sudut dan k_1 dan k_2 menunjukkan besaran gelombang.



Gambar 8. Refleksi fresnel (MEGUMI, 1999)

Jika besaran gelombang dinyatakan dalam $2\pi/\lambda$, dimana λ adalah panjang gelombangnya, dan kita nyatakan a , r dan t adalah cahaya datang, cahaya pantul dan cahaya transmisi, maka komponen tegak lurus dapat dinyatakan dengan cara yang sama. Relasi antara sudut cahaya datang ϕ_1 dan sudut transmisi ϕ_2 cahaya yang mengalami refracted yang bergerak melintasi medium ke medium lainnya dapat dinyatakan dalam Hukum SNELL :

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2. \quad (2)$$

Batasan kondisi persamaan Maxwell adalah membutuhkan komponen medan elektrik dan medan magnet yang harus selalu kontinu pada jalur cahaya tersebut. Kemudian amplitudo dari cahaya yang ditransmisikan dalam medium 2 harus ekuivalen dengan jumlah amplitudo cahaya datang dan cahaya yang dipantulkan pada medium 1 dengan arah x dan y. Untuk ketentuan ini, kita mendapatkan :

$$E_{aj} + E_{rj} = E_{tj}, \quad H_{aj} + H_{rj} = H_{tj} \quad (j = x, y) \quad (3)$$

di mana E dan H adalah medan elektrik dan medan magnet. Ini kemudian dapat dikombinasikan dengan persamaan (1) dan (2) untuk menghasilkan formula FRESNEL yang mengekspresikan pantulan

dari amplitudo cahaya pada komponen secara paralel dan tegak lurus, r_{\parallel} dan r_{\perp} .

$$\begin{aligned} r_{\parallel} &= \frac{E_{r\parallel}}{E_{a\parallel}} = \frac{\tan(\phi_1 - \phi_2)}{\tan(\phi_1 + \phi_2)} \\ r_{\perp} &= \frac{E_{r\perp}}{E_{a\perp}} = -\frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (4)$$

Intensitas cahaya I dapat dinyatakan dalam :

$$I = \frac{nE^2}{2\sqrt{\mu_0}} \quad (5)$$

dimana n adalah refraktif index dari setiap medium dan μ_0 adalah komponen serap untuk hampa udara. Untuk persamaan (4) intensitas sifat pantul cahaya menjadi :

$$\begin{aligned} F_{\parallel} &= \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{\tan^2(\phi_1 + \phi_2)} \\ F_{\perp} &= \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

Intensitas pantul F_{\parallel} dan F_{\perp} mengacu pada koefisien pantul FRESNEL. Persamaan (6) mengindikasikan sudut cahaya datang dengan $F_{\parallel} = 0$. Sudut ini berdasarkan teori sudut BREWSTER disebut ϕ_b . Sudut Brewster adalah $\phi_1 + \phi_2 = \pi/2$ dan hukum SNELL menjadi :

$$\phi_b = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (7)$$

Persamaan (7) ini disebut fase polarisasi untuk pantulan cahaya.

Jika kita melihat lagi persamaan (6) intensitas pantulan akan tergantung pada arah rambatan cahaya, apakah paralel ataukah tegak lurus. Jika kita defenisikan intensitas maksimum dan intensitas minimum adalah I_{max} dan I_{min} . Penambahan I_{max} dan I_{min} sama dengan total intensitas permukaan objek I_s , maka :

$$I_{max} = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s, \quad I_{min} = \frac{F_{\parallel}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s \quad (8)$$

Ingat bahwa I_{min} adalah komponen yang paralel dengan cahaya datang. Dengan menemukan sudut rotasi polarizer yang menunjukkan intensitas minimum, maka sudut orientasi cahaya datang q dapat kita tetapkan.

Derajat polarisasi ρ dapat dinyatakan :

$$\rho = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (9)$$

Derajat polarisasi = 0 untuk unpolarized light, dan 1 untuk cahaya yang terpolarisasi linier. Ketika sudut cahaya datang sama dengan sudut Brewster, hanya komponen yang tegak lurus yang muncul pada cahaya yang dipantulkan (cahaya ini terpolarisasi

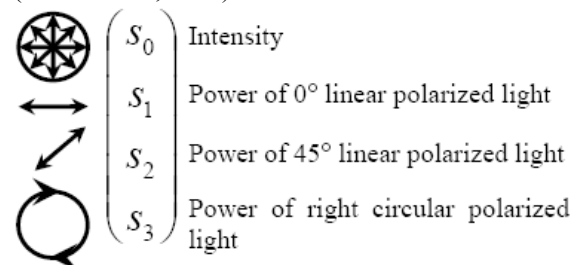
linier) dan derajat polarisasi = 1. Substitusi persamaan (6), (8) ke (9) menghasilkan :

$$\rho = \frac{2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{n^2 - \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi} \quad (10)$$

Menggunakan Matrik Mueller

Kalkulus Mueller adalah metode untuk menghitung status polarisasi cahaya dan biasanya dihitung menggunakan matrik mueller. Cahaya datang direpresentasikan dalam vektor 4 dimensi, yang disebut dengan Stokes vector. Objek yang mengubah status polarisasi direpresentasikan dalam 4x4 matrik yang disebut matrik Mueller.

Pada perhitungan kalkulus Mueller, kita membutuhkan Stokes Vektor yang merepresentasikan cahaya datang. Berikut ini adalah beberapa ketentuan untuk stokes vector (GODSTEIN, 2003) :



S_0, S_1, S_2, S_3 kadangkala juga sering ditulis dengan I, Q, U dan V . Kemudian Stokes Vector yang merepresentasikan cahaya datang ini dapat kita rumuskan sebagai derajat polarisasi sebagai berikut (GODSTEIN, 2003) :

$$\rho = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (11)$$

Untuk menghitung status polarisasi cahaya yang memantul dari suatu benda, maka berlaku ketentuan umum :

$$[\text{output light}] = [\text{Muller matrix}] [\text{input light}]$$

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (12)$$

Beberapa matrik di bawah ini digunakan untuk menghitung keadaan cahaya setelah dipantulkan pada suatu benda (DAISUKE MIYAZAKI, et al. 2005).

Matrik Mueller untuk Pantulan (Reflection) :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} (R_{\parallel} + R_{\perp})/2 & (R_{\parallel} - R_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ (R_{\parallel} - R_{\perp})/2 & (R_{\parallel} + R_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \end{pmatrix}$$

Untuk mengestimasi benda transparan, kita juga memerlukan matrik mueller untuk transmisi, yaitu :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} (T_{\parallel} + T_{\perp})/2 & (T_{\parallel} - T_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ (T_{\parallel} - T_{\perp})/2 & (T_{\parallel} + T_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{T_{\parallel}T_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{T_{\parallel}T_{\perp}} \end{pmatrix}$$

dimana R_{\parallel} R_{\perp} T_{\parallel} T_{\perp} adalah koefisien Fresnel.

4. KESIMPULAN

Perkembangan riset polarization imaging masih terus berkembang sampai saat ini. Dari beberapa penelitian yang disajikan, ada 3 langkah terstruktur yang diambil oleh para peneliti dalam memanfaatkan citra terpolarisasi, yaitu (i) strategi pengambilan informasi polarisasi, (ii) metode instalasi peralatan dan (iii) pemilihan metode analisis polarisasi.

Strategi pengambilan informasi polarisasi dari suatu objek yang diobservasi membutuhkan peralatan penangkap citra tambahan, yaitu dengan mengkombinasikan antara peralatan optik dengan mekanik atau mengkombinasikan optik dan elektronis.

Metode instalasi peralatan juga sangat menentukan, karena semua informasi polarisasi berasal dari cahaya yang dipantulkan, maka harus diperhitungkan dengan seksama sudut cahaya datang dan berapa banyak sumber cahaya. Selain itu juga peletakan kamera harus tepat pada arah sudut pantulnya.

Pemilihan metode analisis polarisasi pada umumnya terkait dengan efisiensi algoritma yang dipilih. Sampai saat ini, masih membutuhkan penelitian yang lebih dalam algoritma mana yang paling efektif dalam ekstraksi informasi polarisasi tersebut. Dua jenis metode yang disajikan dalam paper ini, adalah metode yang paling banyak dipakai oleh peneliti polarization imaging saat ini.

PUSTAKA

- [1] BIN XIE et al (2007), Polarization-Based Water Hazards Detection for Autonomous Off-road Navigation, Proceeding of 2007 IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and System San diego, CA, USA
- [2] DAISUKE MIYAZAKI, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi. (2002). "Determining Shapes of Transparent Objects from Two Polarization Images," in Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.26-31, Nara, Japan, 2002.12
- [3] DAISUKE MIYAZAKI, et al. (2005), Polarization-based shape estimation of Transparent Objects by using Raytracing and PLZT Camera, SPIE's International Symposium on Optics and Photonics 2005 San Diego, CA USA, Vol. 5888, pp. 1-14, Aug. 2005.
- [4] GOLDSTEIN, DENNIS (2003), Polarized Light, Second Edition, CRC Press, ISBN-13: 9780824740535
- [5] HORVATH (1990). Reflection Polarization Patterns at Flat Water Surfaces and their Relevance for Insect Polarization Vision, *J. theor. Biol.* (1995) 175, 27-37
- [6] HUA CHEN AND LAWRENCE B. WOLFF, (1998) Polarization Phase-Based Method For Material Classification In Computer Vision, International Journal of Computer Vision 28(1), 73-83
- [7] JERLOV, N. G. (1976). Optical Oceanography. Amsterdam. Elsevier.
- [8] KONNEN, G. P. (1985). Polarized Light in Nature, Cambridge:Cambridge University Press
- [9] LAWRENCE B. WOLFF (1995), Application of Polarization Camera Technology, Image Understanding, IEEE Expert, 30-38
- [10] LAWRENCE B. WOLFF, ANDREAS ANDREOU (1995), Polarization Camera Sensor, Image & Vision Computing, Vol 13, sevier Science, 497-510
- [11] MEGUMI, SAITO. (1999), Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects Using Polarization in Highlight, IEEE
- [12] P. TERRIER. (2001), A Self Calibrated Image Acquisition System for Polarization Estimation, PSIP Journal
- [13] WEHNER, RÜDIGER. (2001), Polarization Vision – A Uniform Sensory Capacity ?, The Journal of Experimental Biology 204, 2589–2596
- [14] S.SHAFFER. (1985), "Using color to separate reflection components," COLOR Research and Application, Vol. 10, pp.210-218